



Proposition d'un modele de coeur pour le RSF thorium minimisant la quantite de modérateur graphite en coeur

A. Nuttin

► To cite this version:

A. Nuttin. Proposition d'un modele de coeur pour le RSF thorium minimisant la quantite de modérateur graphite en coeur. 2004, pp.1-7. in2p3-00021988

HAL Id: in2p3-00021988

<https://hal.in2p3.fr/in2p3-00021988>

Submitted on 30 Jun 2004

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Proposition d'un modèle de cœur pour le RSF thorium minimisant la quantité de modérateur graphite en cœur.

Note interne LPSC 04-34

A. Nuttin - Juin 2004

Table des matières

1	Problèmes des géométries classiques de cœur de type MSBR	2
2	Une méthode possible de réduction de la quantité de graphite	3
3	Perspectives autour du “Thorium Molten Salt Ring Reactor”	5

Dans le design actuel du TMSR (20 m³ de sel en tout pour 2/3 “sous-flux”, $P_{tot} = 2500$ MWth, 40% en volume de sel dans le cœur, 2 tonnes d'²³³U au démarrage), la puissance volumique moyenne dans le sel vaut environ 200 W/cm³, soit le double de celle du MSBR. Le flux moyen en cœur est donc à peu près doublé, et la durée de vie du graphite par irradiation est réduite de plus de moitié. En effet, le spectre a été considérablement durci (la proportion de neutrons d'énergie supérieure à la dizaine de keV, producteurs de dommages dans le graphite, est plus importante) pour avoir un coefficient de température total satisfaisant (environ -2 pcm/K). Du point de vue du choix de la puissance volumique moyenne en cœur (choix d'un couple puissance totale/volume de sel en cœur), il y a deux approches possibles pour résoudre ce problème préoccupant de l'endommagement rapide du graphite dans le cœur du TMSR.

La première, immédiate, consiste à réduire la puissance volumique, mais au prix d'une augmentation de l'inventaire d'²³³U. Avec une puissance volumique moyenne de 50 W/cm³ et donc une durée de vie du graphite d'au moins 5 ans malgré le durcissement du spectre, l'inventaire est en gros multiplié par 4 (soit 8 tonnes). Une telle augmentation est tout à fait envisageable, en tout cas dans l'optique de la construction d'un premier réacteur réaliste. Cela pose toutefois un problème de potentiel de déploiement, qui perd de son intérêt par rapport à celui des RNR U/Pu. Pour cette raison, cette étude a été, pour l'instant, laissée de côté.

Une deuxième approche consiste à minimiser la quantité de graphite utilisée dans le cœur, et donc à extraire et à retraiter. L'idéal serait en outre d'avoir une disposition de cette quantité minimale de graphite permettant de faciliter son extraction. Une solution permettant de remplir ces deux conditions est, à l'inverse de la première approche, d'augmenter la puissance volumique de façon à réduire les dimensions du cœur et donc la quantité de graphite. En jouant sur la valeur de la puissance totale (minimum "économique" de 1000 MWth) et sur celle de la puissance volumique moyenne (maximum "physique" de 500 W/cm³), il doit être par ailleurs possible de réduire le cœur à un seul canal ou un seul anneau cylindrique, et donc de concentrer le graphite en un ou deux endroits facilement accessibles dans le cœur.

1 Problèmes des géométries classiques de cœur de type MSBR

La ré-évaluation du MSBR a conduit à un nouveau design, portant essentiellement sur la simplification du retraitement et le recalage des coefficients de température, mal évalués dans le concept d'origine. Le concept de Thorium Molten Salt Reactor candidat à Generation IV repose ainsi d'une part sur un retraitement simplifié dans son principe même, d'autre part sur un cœur moins modéré que le MSBR (40% en volume de sel, le reste en graphite) [1] [2]. Encore plus que dans le MSBR (du fait d'un flux plus élevé et du durcissement du spectre), il subsiste un problème de taille : l'endommagement du graphite par irradiation limite sa durée de vie à moins de 2 ans. Passée une fluence critique de l'ordre de 10²² n/cm², le graphite se dilate indéfiniment et doit être remplacé (Figure 1).

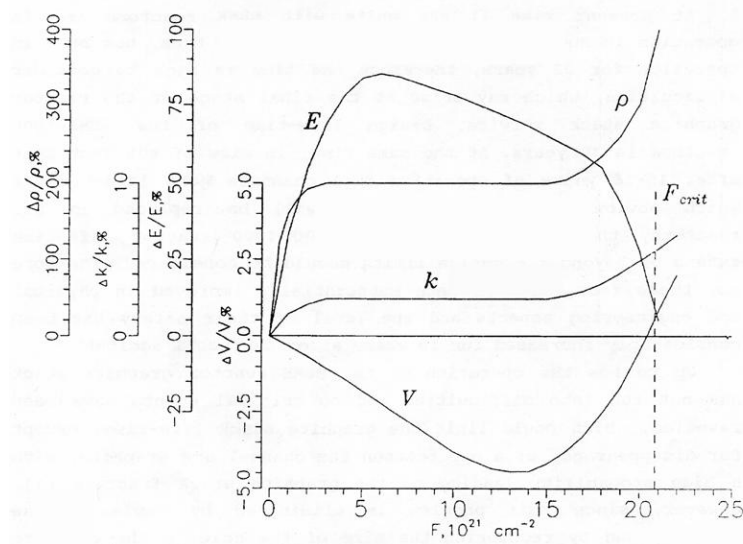


FIG. 1 – Evolution des propriétés physiques du graphite sous irradiation et détermination d'une valeur critique F_{crit} de la fluence [3].

Un autre problème posé par l’emploi du graphite en cœur est sa corrosion par l’écoulement turbulent de sel. Par contre, la température du graphite en cœur est suffisamment élevée pour ne pas s’inquiéter de l’effet Wigner, i.e. de l’accumulation d’énergie sous irradiation par suite du non-réarrangement après déplacement. En effet, une telle accumulation (dangereuse car susceptible de se libérer brutalement) ne se fait pratiquement que pour une température du graphite inférieure à 200 °C [4]. L’approche adoptée dans la suite consiste donc à minimiser l’emploi du graphite dans le cœur, tant en volume (irradiation) qu’en surface (corrosion).

2 Une méthode possible de réduction de la quantité de graphite

Pour illustrer nos études préliminaires sur le thème de la diminution de la quantité de graphite en cœur, il est commode de choisir un cas extrême. En acceptant de réduire la puissance totale du réacteur jusqu’à 1000 MWth et d’augmenter la puissance volumique en cœur jusqu’à 500 W/cm³ (le maximum théorique pour un sel fondu est généralement placé vers 1000 W/cm³), on obtient un volume de sel en cœur de 2 m³. Le sel choisi est celui du TMSR de référence : 3LiF-ThF₄ (4.3 g/cm³ à 900 K). Il s’agit de trouver, dans ces conditions, comment minimiser la quantité de graphite tout en retrouvant le même type de spectre optimisé du point de vue de la régénération et des coefficients de température sur un cœur classique à plusieurs canaux. Pour retrouver des sections efficaces moyennes proches de celles du TMSR de référence (0.9 barn pour la capture du ²³²Th, 18 barn pour la fission de l’²³³U et 2.6 barn pour la capture de l’²³³U), on commence par ajuster le rayon d’un canal de hauteur infinie placé dans un réflecteur de graphite infini (une épaisseur d’1 m suffit). Quelque soit le rayon du canal (de 10 cm à 1 m), on constate que la proportion de 3% d’²³³U environ dans les noyaux lourds du TMSR de référence est insuffisante (k_{eff} toujours inférieur à 0.8). Dans tous les cas, le spectre est en effet plus dur, du fait du manque de graphite bien meilleur modérateur que le sel très peu diffusant [5]. La criticité est atteinte moyennant au moins un doublement de la proportion d’²³³U, ce qui va à l’encontre de la recherche d’un inventaire minimal. Une solution possible est par exemple un canal de 20 cm de rayon, qui donne un k_{eff} proche de 1 pour 6.5% d’²³³U (0.7 barn pour la capture du ²³²Th, 12.6 barn pour la fission de l’²³³U et 1.5 barn pour la capture de l’²³³U).

Une solution pour conserver cette géométrie “canal” peut être de modifier la composition du sel en n’y mettant plus que quelques % de noyaux lourds. Mais l’efficacité de la modération par le sel reste à prouver, et les contraintes physico-chimiques sur le sel devront tôt ou tard être prises en compte. Par ailleurs, cette géométrie interdit les rayons de canal trop petits qui conduisent à des hauteurs irréalistes. Une autre solution est, avec le même sel, de compliquer très légèrement la géométrie en remplaçant le canal par un anneau cylindrique de sel. L’âme cylindrique de graphite ajoutée au centre du cœur est destinée à parfaire la modération. On

procède alors au même type d'étude paramétrique en 2D pour trouver deux valeurs optimales du point de vue du taux de régénération : celle du rayon $R_{\hat{ame}}$ de l'âme de graphite et celle de l'épaisseur E_{anneau} de l'anneau de sel (l'épaisseur $E_{réflecteur}$ du réflecteur radial est maintenue à 1 m). Une combinaison intéressante (l'étude complète reste cependant à faire) est $R_{\hat{ame}} = 40$ cm et $E_{anneau} = 20$ cm. Dans ce cas, les sections efficaces moyennes sont proches de celles du TMSR de référence (0.8 barn pour la capture de ^{232}Th , 18 barn pour la fission de ^{233}U et 2.2 barn pour la capture de ^{233}U) et la proportion d' ^{233}U nécessaire un peu supérieure (4%), ce qui donne un taux de régénération de $(0.96 \times 0.8)/(0.04 \times 20.2) = 0.95$ environ. Il reste clairement sur ce point une grande marge d'optimisation, mais ce premier résultat est encourageant et nous poursuivrons dessus jusqu'à la fin de cette note. Dans tous les cas, on trouve une probabilité importante de fuite des neutrons hors du cœur, réflecteur compris (de l'ordre de 10%). Une couverture thorium risque donc d'être utile pour récupérer ces neutrons de fuite, dans un cœur plus détaillé.

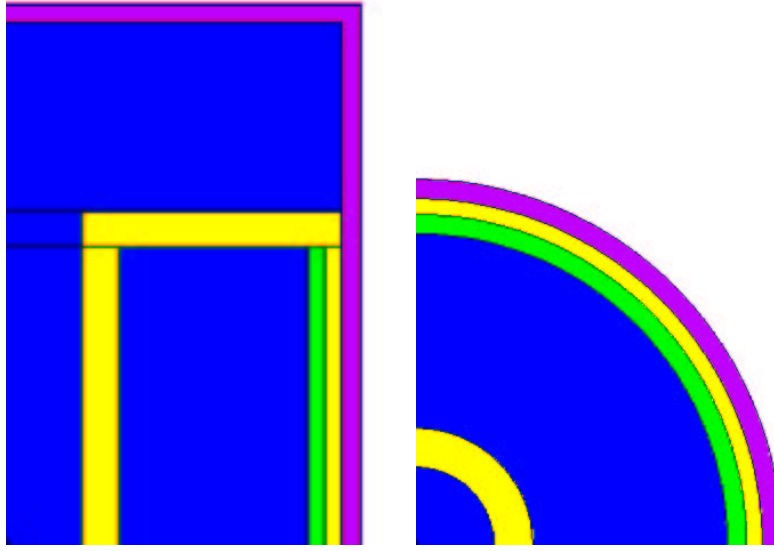


FIG. 2 – Coupes au quart de la géométrie 3D de l'exemple présenté (volume du "canal" = 2 m^3 avec $R_{\hat{ame}} = 40$ cm, $E_{anneau} = 20$ cm et $E_{réflecteur} = 1$ m).

Remarquons ici la simplicité de ce modèle géométrique de cœur. Il est ainsi envisageable de procéder à une optimisation systématique rapide par résolution déterministe de ce réacteur, ne serait-ce qu'en parallèle des calculs MCNP. Avec les dimensions de l'exemple mentionné ci-dessus, un volume en cœur souhaité de 2 m^3 implique une hauteur de 3.2 m. Pour obtenir un modèle 3D de réacteur pour MCNP (Figure 2), on choisit ensuite la hauteur des réservoirs (ou "plena") de façon à y obtenir le même spectre que dans l'anneau de sel. En ajoutant des réflecteurs axiaux en graphite, ceci est simplement obtenu en prenant comme hauteur de réservoir 20 cm, i.e. l'épaisseur de l'anneau de sel. On a alors environ 4 m^3 de sel dans les réservoirs, soit en tout 6 m^3 "sous-flux"

(l'essentiel de la puissance restant produit dans l'anneau). Les échangeurs (environ 3 m^3 , soit $1/3$ du volume total de sel de 9 m^3) sont simulés classiquement, comme une couronne cylindrique autour du cœur protégée par du B_4C . Ce dimensionnement grossier n'a ici pour but que d'obtenir des valeurs moyennes globales de sections efficaces. Les dimensions données sont d'autant plus indicatives que des techniques récentes d'échange de chaleur (sel/graphite/hélium par exemple) montrent qu'il est possible de réduire fortement la quantité de sel hors-flux [6]. Dans ce cas, on trouve les mêmes sections efficaces moyennes dans l'anneau et dans les réservoirs : 0.8 barn pour la capture du ^{232}Th , 17 barn pour la fission de ^{233}U et 2.1 barn pour la capture de ^{233}U . Elles sont légèrement modifiées ensemble, par rapport aux valeurs du réacteur infini selon Z , du fait de l'influence des réflecteurs axiaux. Cela nous donne toujours un taux de régénération très proche de 1, compte tenu de la proportion d' ^{233}U qui est toujours de 4%.

En choisissant comme puissance nominale 1000 MWth (soit une puissance électrique de 400 voire 500 MWe comparable à celle du GT-MHR), on obtient une puissance volumique moyenne en cœur de 500 W/cm^3 . Le flux moyen dans l'âme de graphite est de $2.3 \cdot 10^{15} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ($2.0 \cdot 10^{15} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ dans l'anneau de sel) ; il est 3 fois plus élevé que dans le graphite en cœur du MSBR. La durée de vie de ce graphite central est donc d'un an tout au plus, mais sa quantité est réduite et son remplacement paraît plus facile que celui d'un cœur classique. Dans le réflecteur, le flux moyen n'est que de $9.0 \cdot 10^{14} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ avec un spectre bien moins dur qu'au centre. La durée de vie de ce graphite, devant être lui aussi remplacé, est donc au moins de 4 ans. La proportion du volume à remplacer reste cependant à déterminer plus précisément, en exploitant les données de type "d.p.a." (déplacements par atome) des bases à l'aide de NJOY.

3 Perspectives autour du "Thorium Molten Salt Ring Reactor"

Il est prématuré de dire que ce modèle de cœur simplifié à haute puissance volumique (pour une puissance totale réduite) est intéressant, voire plus intéressant que le TMSR de référence. Néanmoins, l'étude de ce "Thorium Molten Salt Ring Reactor" mérite d'être approfondie, en commençant par les études paramétriques simplifiées en 2D, afin de conclure sur les contraintes de la modération. Une autre piste est de minimiser les fuites importantes de neutrons. Une solution envisageable consisterait à compliquer légèrement la géométrie du cœur en ajoutant dans l'anneau de sel un anneau de graphite de quelques centimètres d'épaisseur (le libre parcours moyen dans le graphite est d'environ 3 cm dans les cas qui nous intéressent). Cela permettrait de "centraliser" la modération des neutrons, en diminuant la part et l'énergie des neutrons restant à modérer pour le réflecteur, et susceptibles de fuir. Cet anneau de graphite pourrait être remplacé aussi facilement que l'âme centrale. Remarquons - fait amusant - que le cœur ressemble alors, avec des dimensions caractéristiques 10 fois plus grandes, à une seule cellule de réacteur UNGG (Figure 3), l'anneau de graphite jouant le rôle de la gaine et le sel celui du caloporteur gaz.

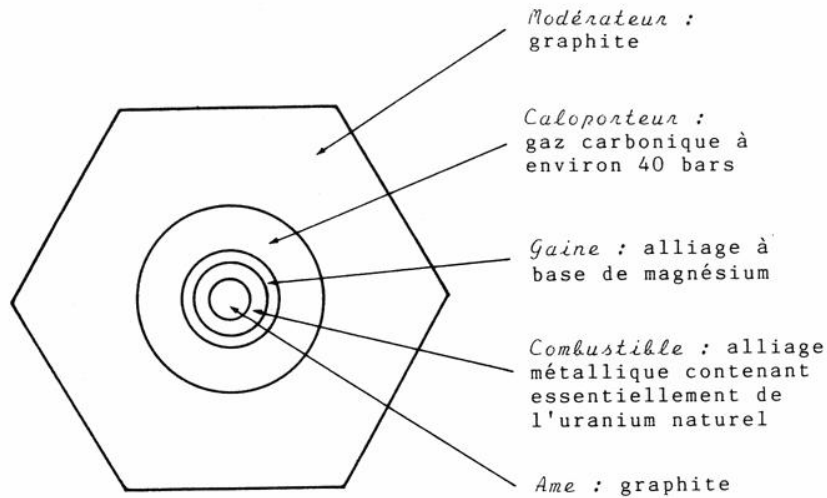


FIG. 3 – Cellule de réacteur UNGG (hexagone de 6 cm de côté) [7].

Une fois les fuites minimisées au mieux, il restera si nécessaire à utiliser les neutrons restants, en priorité dans une couverture en thorium pour améliorer la régénération du système complet (une autre solution étant l'insertion éventuelle de PFVL à transmuter). Il s'agit alors d'étudier l'emplacement idéal : dans le réflecteur (au bord ? au centre ?), dans l'âme de graphite ou plutôt dans l'anneau de graphite ? Ce dernier présenterait l'avantage de minimiser la quantité de thorium à y placer. La durée d'un cycle d'irradiation du thorium pourrait être ajustée pour correspondre à la fréquence de remplacement de l'anneau de graphite. Notons que l'âme de graphite serait a priori réservée de préférence aux barres de contrôle et autres appareillages.

Dans tous les cas, des calculs d'évolution sont ensuite indispensables pour confirmer (ou au contraire infirmer ?) l'intérêt de ce type de cœur et de puissance associée. En particulier, le Pa laissé en cœur sera plus gênant que dans le TMSR de référence du fait de l'augmentation du flux. Il reste en outre à vérifier que la minimisation de la quantité de graphite en cœur s'accompagne bien d'une diminution de la contribution positive du graphite à la réactivité lors d'une augmentation de sa température. Pour obtenir un coefficient total suffisamment négatif, il a été montré qu'un spectre suffisamment dur suffit [2], ce qui peut s'ajuster simplement, par exemple en jouant sur l'épaisseur de l'anneau de sel et/ou la position de l'anneau de graphite.

Si l'optimisation neutronique complète qui pourrait suivre cette proposition est concluante, il faudrait alors comparer ce genre de cœur au TMSR de référence du point de vue de sa thermohydraulique. Statiquement dans un premier temps, pour obtenir les profils de puissance et de température (couplage MCNP/TRIO-U) et en déduire des valeurs plus précises de coefficients

de température. Ensuite cinétiquement, pour comparer la stabilité respective des deux systèmes en cas d'insertion rapide de réactivité. Nous pouvons toutefois relever d'ores et déjà un avantage important sur le plan de la thermique ; il n'est plus nécessaire d'ajuster la vitesse du sel en fonction de la position radiale des canaux dans ce cas de figure. Ceci doit contribuer à une réduction importante des pertes de charge, ce qui est également à vérifier. Toutes ces études possibles de thermohydraulique devront intégrer les nouvelles techniques d'échange de chaleur et de production d'électricité déjà évoquées [6], qui vont dans le même sens prometteur d'une réduction des volumes de sels fondus utilisés et d'une augmentation des températures.

Références

- [1] L. Mathieu et al. Thorium Molten Salt Reactor : from high breeding to simplified reprocessing, GLOBAL 2003, New-Orleans (USA), November 16-20, 2003.
- [2] E. Merle-Lucotte et al. Molten Salt Reactors and Possible Scenarios for Future Nuclear Power Deployment, PHYSOR 2004, Chicago (USA), April 25-29, 2004.
- [3] P.A. Platonov et al. Radiation damage and life-time evaluation of RBMK graphite stack, Kurchatov Institute.
- [4] Académie des Sciences. Matériaux du nucléaire, Rapport Science et Technologie No. 5 (2000).
- [5] A. Nuttin. Tab. 4.4, p. 85, Thèse de doctorat (Université Joseph Fourier de Grenoble, 2002).
- [6] C.W. Forsberg et al. An Advanced Molten Salt Reactor Using High-Temperature Reactor Technology, Proceedings of ICAPP'04, Paper 4152, Pittsburgh (USA), June 13-17, 2004.
- [7] P. Reuss. Eléments de neutronique, INSTN-CEA (1986).